

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

VINÍCIUS ALBERTO CAMARGO TELES

**ESTRATÉGIA DE REDUÇÃO DO ESPAÇO DE BUSCA APLICADA NA
RECONFIGURAÇÃO ÓTIMA DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS**

Ilha Solteira
2023

VINÍCIUS ALBERTO CAMARGO TELES

**ESTRATÉGIA DE REDUÇÃO DO ESPAÇO DE BUSCA APLICADA NA
RECONFIGURAÇÃO ÓTIMA DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS**

Trabalho de Graduação apresentado à Faculdade de Engenharia do Câmpus de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

**Prof. Dr. Leonardo Henrique Faria Macedo
Possagnolo**
Orientador

Ilha Solteira
2023

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

T269e Teles, Vinícius Alberto Camargo.
Estratégia de redução do espaço de busca aplicada na reconfiguração ótima de sistemas de distribuição radiais / Vinícius Alberto Camargo Teles. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023
47 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2023

Orientador: Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo

Inclui bibliografia

1. Fluxo de potência radial. 2. Otimização de sistemas elétricos. 3.
Reconfiguração de alimentadores. 4. Redução do espaço de busca.

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos onze dias do mês de abril do ano de dois mil e vinte e três, o discente **Vinícius Alberto Camargo Teles**, matriculado sob o nº 171052561, tendo como banca examinadora o seu orientador, o Prof. Dr. Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo, Prof. Dr. Matheus Henrique Marcolino e o Doutorando Lucas do Carmo Yamaguti, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "Estratégia de Redução do Espaço de Busca Aplicada na Reconfiguração Ótima de Sistemas de Distribuição Radiais", obtendo a nota 10.0 (dez vírgula zero) e conceito aprovado.



Prof. Dr. Leonardo Henrique Faria Macedo

Possagnolo

- Orientador -



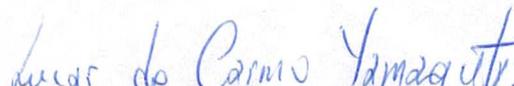
Vinícius Alberto Camargo Teles

- Discente -



Prof. Dr. Matheus Henrique Marcolino

- Membro da Banca -



Doutorando Lucas do Carmo Yamaguti

- Membro da Banca -

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a toda minha família, em especial aos meus pais Maurício Andrade Teles e Eliana Cristina de Camargo Teles por todo o apoio durante esses anos de graduação.

Aos meus companheiros de sala de aula, pelo apoio durante os estudos e pelas risadas compartilhadas, inclusive nos momentos difíceis.

Aos meus amigos que me acompanham desde antes da graduação e aos que fiz desde que iniciei minha carreira profissional, por todo o suporte.

Ao meu orientador Prof. Dr. Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo por ter confiado em mim e aceitado me orientar neste trabalho de graduação.

Ao Prof. Dr. Rubén Romero, pelas sugestões, paciência e todo auxílio durante este trabalho.

A todos os professores que fizeram parte da minha educação, pela excelência da qualidade técnica de cada um.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), projeto 2015/21972-6.

RESUMO

O presente trabalho propõe o desenvolvimento de uma estratégia heurística para resolução do problema de reconfiguração ótima de sistemas de distribuição de energia elétrica radiais de forma eficiente. Como o número de topologias radiais para este problema é elevado e aumenta em função do porte da rede, o método apresentado reduz a quantidade de soluções do problema, fixando alguns ramos do sistema elétrico até que a quantidade de topologias radiais que podem ser obtidas seja razoável, resolvendo então um número controlável de fluxos de potência. Na primeira etapa, é resolvido um fluxo de potência considerando todos os ramos do sistema conectados, para identificar aqueles de maior fluxo de potência aparente. Em seguida, é aplicado um algoritmo para incorporar à rede os k_1 ramos de maior valor de fluxo, que não formem laços, que serão considerados fixos na próxima etapa. Por fim, determina-se apenas a parcela das topologias radiais com os k_1 ramos conectados e fixos, onde é resolvido um fluxo de potência radial para cada uma e encontra-se aquela que apresenta as menores perdas de potência ativa. O valor de k_1 pode ser escolhido de acordo com a quantidade de fluxos de potência para redes radiais que se deseja executar. Na literatura especializada, essa estratégia é chamada de redução do espaço de busca, sendo classificada como heurística porque não garante que o ótimo global seja encontrado, já que durante a redução do espaço de busca, a topologia ótima pode ser eliminada. O algoritmo foi testado com os sistemas de 33 e 84 nós.

Palavras-chave: Fluxo de potência radial, otimização de sistemas elétricos, reconfiguração de alimentadores, redução do espaço de busca.

ABSTRACT

This work proposes the development of a heuristic strategy that aims to solve the problem of reconfiguration of electrical power distribution systems in an efficient way. As the number of radial configurations is very high and increases according to the size of network, the method reduces the number of solutions of the problem by fixing certain system's branches until a reduced configuration is found, so that the number of radial topologies that can be obtained is acceptable and the number of power flows for radial networks to be solved is reasonable. In the first step, one power flow for weakly meshed distribution networks is solved in order to find the branches with the higher values of apparent power flow. Then, an algorithm is used to find a radial topology considering the k_1 branches of higher apparent power flow values always connected, without forming loops. The value of k_1 can be chosen according to the range of power flows for radial networks that is intended to be solved. This method is called search space reduction, being a heuristic strategy because it does not guarantee that optimal configuration will be found, since that one can be eliminated during the search space reduction stage. The strategy was tested with the 33-node and 84-node systems.

Keywords: Optimization of electrical power distribution networks, power flow algorithm for radial systems, reconfiguration of feeders, search space reduction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de 14 nós.....	10
Figura 2 – Sistema de distribuição radial	19
Figura 3 – Sistema de distribuição radial por camadas.....	19
Figura 4 – Parte de um sistema de distribuição radial.....	20
Figura 5 – Soma das correntes no método de varredura	22
Figura 6 – Método de varredura para fluxo de potência de sistemas radiais	24
Figura 7 – Sistema de distribuição fracamente malhado.....	25
Figura 8 – <i>Breakpoint</i> com injeções de correntes nodais.....	25
Figura 9 – Modelo multiporta da rede radial visto pelos <i>breakpoints</i>	26
Figura 10 – Equivalente de Thévenin da rede radial pelos nós dos <i>breakpoints</i>	26
Figura 11 – Fluxo de potência para redes fracamente malhadas.....	29
Figura 12 – Matriz Laplaciana para o sistema de 14 nós	34
Figura 13 – Matriz Laplaciana estendida para o sistema de 14 nós.....	35
Figura 14 – Matriz Laplaciana na primeira etapa de redução	36
Figura 15 – Soma das linhas e colunas dos nós 5 e 6.....	37
Figura 16 – Matriz Laplaciana após eliminar formação do supernó 5	38
Figura 17 – Sistema de 33 nós.....	40
Figura 18 – Sistema de 84 nós.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados para o sistema de 33 nós	41
Tabela 2 – Resultados para o sistema de 84 nós	43

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	9
1.1.	Métodos heurísticos para um nível de demanda	11
1.2.	Estratégias considerando vários níveis de demanda.....	14
2.	O PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	17
2.1.	Fluxo de potência para redes radiais	17
2.1.1.	Cálculo das correntes nos ramos	20
2.1.2.	Cálculo da tensão nas barras	22
2.1.3.	Cálculo das perdas	23
2.2.	Fluxo de potência para redes fracamente malhadas	23
2.2.1.	Correntes nos <i>breakpoints</i> pelo método de compensação	25
2.2.2.	Matriz de impedâncias equivalentes vistas pelos <i>breakpoints</i>	27
2.2.3.	Processo iterativo de compensação	27
2.2.4.	Escolha dos <i>breakpoints</i>	29
2.3.	Estratégia heurística	30
2.4.	Algoritmo de Prim para fixar os ramos fechados	31
2.5.	Método para determinação das soluções radiais.....	33
2.6.	Algoritmo para formação da matriz Laplaciana reduzida	35
2.7.	Algoritmo heurístico proposto	38
2.8.	<i>Software</i> MATLAB	39
3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
3.1.	Sistema de 33 nós	40
3.2.	Sistema de 84 nós	41
4.	CONCLUSÕES.....	44
	REFERÊNCIAS.....	45

1. INTRODUÇÃO

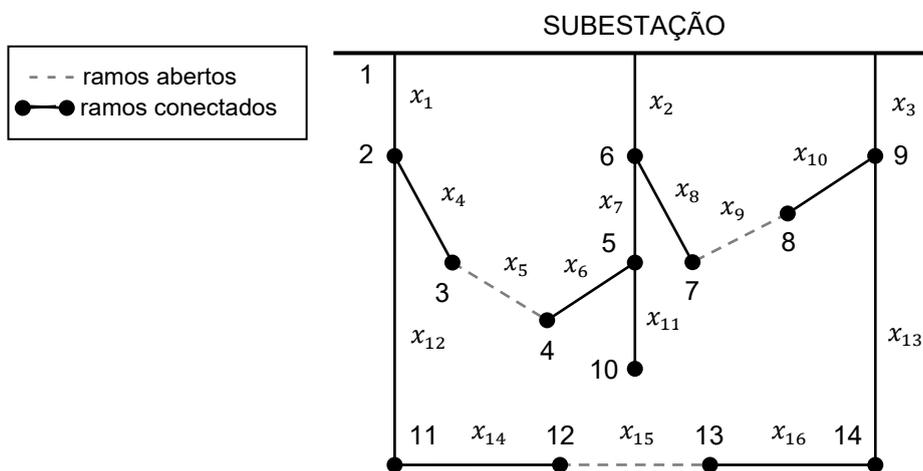
Atualmente, os sistemas de distribuição de energia elétrica estão operando de forma cada vez mais eficiente devido à requisitos regulatórios e seus benefícios econômicos e medidas visando minimizar as perdas, principalmente à um baixo custo, são desejáveis. A redução das perdas na rede de distribuição traz as seguintes vantagens:

- Melhora no perfil de tensão da rede e aumento da vida útil dos equipamentos e da capacidade de fornecimento, devido ao alívio do sistema de distribuição;
- Adia a necessidade de investimentos a curto e médio prazo na expansão do sistema de distribuição, pois reduzindo as perdas, reduz-se o fluxo de potência nos condutores;
- Adia a necessidade de investimentos a curto e médio prazo na expansão do sistema de transmissão, já que a reconfiguração ótima da rede reduz a demanda das linhas de transmissão em horários de pico;
- Menor demanda em horários de pico, adiando a necessidade de ampliar a capacidade de geração;
- Benefícios ambientais, pois reduzindo a necessidade de gerar energia por meio de combustíveis fósseis, reduz-se a poluição.

Uma das estratégias para melhorar a operação desses sistemas é a reconfiguração ótima dos alimentadores, que consiste em um dos problemas mais relevantes relacionados à eficiência na operação de redes de distribuição. Apesar dos sistemas de distribuição possuírem estrutura malhada, a operação é realizada na condição radial, com a presença de ramos energizados e não energizados. Pela teoria dos grafos, esses ramos são chamados respectivamente de árvore geradora e ramos de ligação. Logo, dado um sistema malhado, o objetivo desse problema é encontrar uma topologia radial, de modo a otimizar um objetivo, geralmente reduzir as perdas do sistema para um determinado perfil de carga. Os dados iniciais do problema são fornecidos pela configuração malhada da rede de distribuição, pelos parâmetros elétricos dos condutores, as demandas em cada nó do sistema, os limites de corrente elétrica nos ramos

e tensão nos nós, e tensão na subestação. Portanto, a solução a ser encontrada é a topologia radial que dentre todas as possíveis configurações radiais, produz as mínimas perdas de potência ativa no sistema de distribuição. Essa solução, deve respeitar as leis de Kirchhoff, os limites de corrente e tensão e a condição de configuração radial do sistema. Na Figura 1 mostra-se um exemplo de sistema de distribuição com 14 nós e 16 ramos muito utilizado para fins acadêmicos. Para formar uma topologia radial, o mesmo deve apresentar 13 ramos conectados e 3 ramos abertos.

Figura 1 – Sistema de 14 nós



Fonte: Civanlar et al. (1988).

Na literatura especializada, foram apresentadas diversas técnicas de otimização para resolver o problema da reconfiguração. Entre elas, estão heurísticas, meta-heurísticas e modelos exatos, resolvidos com *solvers* comerciais. Uma abordagem possível de se utilizar é a teoria de grafos, buscando uma árvore geradora que minimize uma função de custo.

Para os métodos heurísticos, existem dois grupos: os que trabalham com somente um nível de demanda, isto é, utilizam a demanda de pico em cada nó, e aqueles que são construídos considerando vários níveis de demanda ao longo da operação do sistema de distribuição, ou seja, as demandas de pico em cada nó podendo ocorrer em horários diferentes. Ambos, baseiam-se em três possibilidades para resolução do problema de reconfiguração:

- Todos os ramos encontram-se inicialmente abertos e em cada passo, um ramo é fechado (considerando um índice de sensibilidade) até se obter uma topologia

radial;

- Todos os ramos do sistema encontram-se fechados (topologia totalmente malhada) e em cada etapa, um ramo é aberto (de acordo com um índice de sensibilidade), até que se atinja uma topologia radial;
- Inicialmente tem-se uma configuração radial, e a partir dela são feitas trocas entre ramos conectados e desconectados, sempre mantendo a radialidade, até que não haja melhoria nas perdas.

Os algoritmos heurísticos têm como principal vantagem a capacidade de encontrar soluções de boa qualidade em tempos computacionais reduzidos. No entanto, como desvantagem, eles podem ficar limitados ao primeiro ótimo local encontrado.

Como alternativa a este viés, foram propostas várias meta-heurísticas, como por exemplo *variable neighborhood search* (VNS), *greedy randomized adaptive search procedure* (GRASP), *tabu search* (TS), algoritmo genético (AG), *simulated annealing* (SA) entre outros.

As propostas envolvendo modelos matemáticos geralmente consideram modelos aproximados, como o modelo de corrente contínua (DC) ou modelos que diminuem as restrições da operação da rede de distribuição. Pode-se citar para estes tipos, por exemplo, o algoritmo *branch and bound* e suas variações como técnica de solução. Mais recentemente, foram propostos modelos de corrente alternada (AC) para o fluxo de potência, que representam uma aproximação quase exata do problema.

No contexto deste trabalho, são apresentadas e discutidas a seguir as heurísticas mais relevantes para resolução do problema de reconfiguração considerando apenas um nível de demanda e propostas que incorporam mais de um nível de demanda, que representam de forma mais realista a operação do sistema. Detalhes das outras abordagens citadas podem ser encontradas em Possagnolo (2015).

1.1. Métodos heurísticos para um nível de demanda

Merlin e Back (1975) apresentam uma proposta que afirma que a topologia que minimiza as perdas é a totalmente malhada. Como na prática essa é uma hipótese quase sempre verdadeira, pode-se adotar como premissa que uma configuração radial deve apresentar uma distribuição de fluxos de potência com as menores variações no que diz respeito à topologia com todos os ramos fechados. Desta forma, em cada

passo do algoritmo formulado por Merlin e Back, é resolvido um fluxo de potência para redes malhadas, a fim de identificar os valores de fluxo de potência em cada ramo do sistema e assim retirar aquele com o menor fluxo que, se for desconectado, a topologia resultante permaneça conexa, e que provoque a menor diferença nos fluxos de potência dos ramos restantes. As iterações terminam quando se encontra uma topologia radial.

Embora o algoritmo heurístico em questão seja rápido e encontre soluções de qualidade boa, dificilmente encontra a melhor solução. Deste modo, para o sistema de 14 nós da Figura 1, por exemplo, o algoritmo de Merlin e Back requer o cálculo de três fluxos de potência para redes malhadas (removendo um ramo em cada etapa) e um fluxo de potência radial, a fim de determinar as perdas da topologia radial resultante do último passo.

Partindo de uma topologia radial inicial e realizando a troca entre um ramo aberto e um fechado, mantendo a rede radial, Civanlar et al. (1988) obtém a configuração com as mínimas perdas. A variação das perdas entre uma configuração e outra é estimada por meio de uma fórmula aproximada. Os autores destacam que para que seja obtida uma redução das perdas, é necessário que exista uma queda de tensão considerável sobre um ramo aberto e que a carga no lado de maior queda de tensão seja transferida para o outro lado. Além disso, a regra utilizada para calcular a variação das perdas no processo de transferência de carga resultante da troca de ramos, na maioria dos casos, fornece um valor menor em relação ao valor obtido por um fluxo de potência AC.

Por meio de um fluxo de potência para redes fracamente malhadas, de forma que a chave que apresente o menor fluxo, e mantenha a rede conexa seja aberta, Shirmohammadi e Hong (1989) solucionam o problema de reconfiguração iniciando com a topologia totalmente malhada e realizando o cálculo das correntes em cada estágio. O método proposto é semelhante ao de Merlin e Back (1975), no entanto, utiliza um fluxo de potência para redes fracamente malhadas e considera as restrições de tensão máxima nos nós e de fluxo de corrente máximo nos ramos. Se a abertura do ramo com menor fluxo resultar em violações dessas restrições, a chave deste ramo deve ser fechada e a próxima com o menor fluxo, é aberta. Este processo é repetido até que não haja mais violações. Entretanto, como o fluxo é calculado para topologia malhada e o ramo a ser aberto é determinado apenas na última etapa, o método não leva em consideração a formação de laços nas etapas anteriores, desviando neste

ponto em relação à condição de operação real do sistema, e, portanto, a solução obtida pode não ser de boa qualidade.

Baran e Wu (1989) considera tanto a otimização das perdas quanto o balanceamento das cargas na resolução do problema de reconfiguração. São formulados dois modelos aproximados, um para calcular o fluxo de potência e outro para a determinação das perdas entre duas configurações radiais resultantes da troca de ramos em um laço, que pode ser aplicado em sistemas desequilibrados por incluir explicitamente os fluxos de potência reativa. Por fim, é desenvolvida uma estratégia para redução do espaço de busca, na qual os autores partem da premissa de que a troca de ramos abertos com ramos fechados e adjacentes a eles resultam em um incremento no valor das perdas e dessa forma, possíveis trocas no laço também chegarão no mesmo resultado, não sendo necessário analisá-las.

Com uma heurística que considera a formação de um laço em cada passo, Goswami e Basu (1992) conseguem contornar o viés apontado na estratégia de Shirmohammadi e Hong (1989). Para tanto, ao invés de fechar todos os ramos e em seguida fazer a abertura sequencial deles até a obtenção de uma configuração radial, nesta abordagem, os autores, em cada etapa, fecham uma chave, de modo que seja introduzido um laço na rede, que retorna para a topologia radial abrindo a mesma chave ou alguma outra pertencente ao mesmo laço, dependendo do valor do fluxo de potência.

Como uma extensão das heurísticas formuladas por Merlin e Back (1975) e Shirmohammadi e Hong (1989), Borozan, Rajičić e Ačkovsk (1997) apresentam um método para minimizar as perdas em sistemas de distribuição trifásicos a três fios e desequilibrados, no qual, partindo de uma configuração totalmente malhada, é aberta uma chave do sistema em cada passo.

Uma estratégia heurística chamada de força bruta para o problema de reconfiguração, onde busca-se todas as topologias radiais existentes e o cálculo do valor das perdas para cada uma delas, a fim de encontrar a solução ótima, é apresentada em Morton e Mareels (2000). Para o sistema mostrado na Figura 1, por exemplo, existem 190 topologias radiais possíveis, o que requer a resolução de um fluxo de potência para cada uma delas. Embora a proposta teoricamente encontre a solução ótima, na prática, a alta capacidade de processamento exigida torna sua aplicação inviável em sistemas de médio e grande porte. Para reduzir a carga computacional, os autores resolveram um fluxo de potência simplificado e desenvolveram uma estratégia para

encontrar todas as topologias radiais a partir de uma configuração inicial.

Gomes et al. (2005) propõe uma estratégia heurística para resolver o problema de reconfiguração, iniciando o processo de resolução a partir da configuração malhada. Em cada etapa, uma chave é aberta, até encontrar uma topologia radial. O algoritmo testa todas as chaves que podem ser abertas e mantém o sistema conexo. A chave escolhida é aquela que ao abrir, causa a menor variação na função objetivo do problema, neste caso, o valor mínimo das perdas. Na segunda etapa do algoritmo, é realizada a troca de ramos com os identificados anteriormente, para minimizar as perdas calculadas na primeira fase da heurística.

Raju e Bijwe (2008) desenvolvem uma heurística dividida em duas partes para resolver o problema de reconfiguração, semelhante à abordagem de Gomes et al. (2005). No primeiro estágio, são usadas sensibilidades, para a partir da topologia malhada, realizar a abertura das chaves em cada etapa e, num segundo estágio, é feita a troca de ramos para otimizar a solução obtida na primeira parte do algoritmo.

Um método que considera tanto a redução das perdas quanto custo mínimo, utilizando um procedimento de troca de ramos é formulado em Ababei e Kavasseri (2011). Ainda no mesmo trabalho, é desenvolvida uma estratégia de redução das perdas usando um paradigma de caminhos aleatórios (*random walks*). A performance obtida pela heurística proposta é superior por exemplo à vista em Baran e Wu (1989), pois consegue obter soluções iguais ou de qualidade melhor, em tempos computacionais menores.

Concluindo, todos os trabalhos apresentados nesta seção e outros que utilizam heurísticas, tem em comum o fato de resolver o problema de reconfiguração incluindo pelo menos uma etapa de troca de ramos. Além disso, o algoritmo heurístico de abertura sequencial de chaves proposto por Shirmohammadi e Hong (1989) nem sempre é capaz de encontrar uma solução factível, devido a formação de laços durante o processo, podendo em alguns casos ficar preso em *loops* infinitos, sem obter assim nenhuma solução.

1.2. Estratégias considerando vários níveis de demanda

LEE e BROOKS (1988) foram os pioneiros na resolução do problema de reconfiguração considerando vários níveis de demanda. Além disso, é implementado no método a alocação de capacitores, mostrando que a reconfiguração para variações

significativas da carga torna-se vantajosa.

Em Wagner, Chikhani e Hackam (1991) é utilizada uma técnica de programação linear em conjunto com uma heurística de busca, indicando vantagens econômicas no uso de heurísticas e como podem ser adequadas para aplicações em tempo real.

Chen e Cho (1993), em sua proposta, consideram a redução das perdas para sistemas de distribuição à curto e longo prazo por meio de um plano de chaveamento. Para o planejamento de curto prazo, é utilizado um método *branch and bound*. As operações de chaveamento são representadas por um problema de otimização, que então é dividido em vários subproblemas, que visam encontrar as menores perdas advindas de um chaveamento. Os autores ainda aplicam uma estratégia heurística para realizar um prognóstico da variação máxima das perdas.

Taleski e Rajičić (1997) propõem uma heurística baseada em *branch exchange*. Uma das desvantagens dessa proposta é que nela não foi considerada a minimização das operações de chaveamento, o que na prática pode reduzir a vida útil dos componentes associados a rede.

Em Lopez et al. (2004) é feito o comparativo entre os resultados do problema de reconfiguração obtidos para vários níveis de demanda e um único nível de demanda, considerando valores médio e máximo de demanda. Pelas análises apresentadas, o autor conclui que a reconfiguração da rede de hora em hora não é vantajosa devido ao alto número de chaveamentos sendo realizados para cada nível de demanda.

Amasifen, Romero e Mantovani (2005) utilizam um algoritmo evolutivo para reconfiguração, considerando diferentes níveis de demanda e apenas uma topologia ao longo de toda a operação. O conjunto inicial dos ramos são obtidos por meio heurísticas construtivas de Prim e Kruskal, sendo os pesos dos ramos dados pelas suas resistências, reatâncias e módulos das impedâncias. Os autores realizam testes para sistemas de pequeno e médio porte, considerando três níveis de demanda e variando os parâmetros elétricos do algoritmo.

Bueno (2005) elabora duas propostas heurísticas, uma baseada no algoritmo de abertura sequencial e a segunda no algoritmo construtivo de Prim e Kruskal, além de um algoritmo GRASP para encontrar as perdas mínimas para o problema de reconfiguração. Assim como Amasifen, Romero e Mantovani (2005), o autor considera uma topologia única durante a operação da rede e oito níveis de demanda das cargas. A estratégia de *branch exchange* mostrada neste trabalho considera os a duração destes níveis.

Concluindo, os trabalhos que tratam do tema da reconfiguração ótima para vários níveis de demanda mostram que operações de chaveamento devem ser evitadas, de forma que considerar uma só topologia para todo o período de funcionamento é mais viável. Apesar de se aproximar mais da operação real da rede de distribuição, o problema da reconfiguração para vários níveis de demanda torna-se mais complexo à medida que o número de níveis de demanda aumenta.

2. O PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Conforme mencionado anteriormente, o problema de reconfiguração resume-se na busca da topologia radial de um sistema de distribuição dentre todas as topologias radiais possíveis, que minimizem as perdas de potência ativa. A restrição de radialidade dificultou por muito tempo o desenvolvimento de modelos matemáticos que utilizassem somente álgebra simples para solucioná-lo, sendo que somente na última década foram criadas formulações completas para o mesmo (LAVORATO et al., 2010; LAVORATO et al., 2012). Entretanto, devido às características combinatórias do problema, o modelo matemático ainda é muito complexo de se resolver por meio de técnicas clássicas de otimização. Por esse motivo, heurísticas e meta-heurísticas são as principais estratégias usadas dentro deste contexto. Neste trabalho, é apresentada uma heurística que não utiliza modelagem matemática. Sendo assim, o problema de reconfiguração pode ser formulado de forma genérica do seguinte modo:

Minimizar as perdas ativas no sistema de distribuição

Sujeito a:

Satisfazer as duas leis de Kirchhoff no sistema elétrico

Limites de tensão nos nós e corrente nos ramos durante a operação

Condição de radialidade na operação do sistema de distribuição

As únicas ferramentas matemáticas usadas no trabalho são algoritmos de fluxo de potência para redes radiais e fracamente malhadas e um algoritmo para montagem da matriz Laplaciana, todos apresentados nos próximos tópicos.

2.1. Fluxo de potência para redes radiais

Para desenvolver a estratégia heurística proposta neste trabalho, foi indispensável a implementação de um fluxo de potência para redes de distribuição radiais confiável e que apresentasse boa performance. Este algoritmo foi usado para calcular as perdas ativas e para verificação das restrições operacionais.

Embora o problema de fluxo de potência possa ser modelado por meio de relações algébricas não lineares, existem métodos específicos muito mais rápidos, que levam em conta as características particulares dos sistemas de distribuição e que convergem de forma mais satisfatória em relação ao método iterativo de Newton, utilizado na modelagem matemática. A abordagem feita neste trabalho aproxima-se da proposta por Shirmohammadi et al. (1988). Apesar de ter estrutura malhada, os sistemas de distribuição operam em configuração radial (tornando o fluxo de potência mais simples), apresentam uma alta relação R/X e apresentam circuitos com comprimentos variados, motivos pelos quais é necessário implementar um fluxo de potência diferente dos apresentados geralmente para problemas envolvendo sistemas de transmissão (POSSAGNOLO, 2015). Para um sistema radial e que opera em regime permanente, pode-se considerar as seguintes hipóteses:

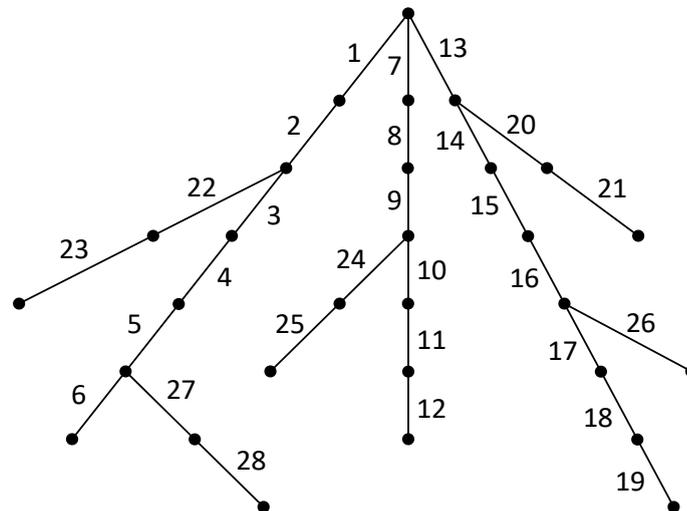
- As cargas possuem demandas constantes de potência ativa e reativa;
- O sistema é equilibrado e pode ser representado por um equivalente monofásico.

O método utilizado para resolução do fluxo de potência neste trabalho é conhecido como método de varredura, pois o algoritmo realiza um processo iterativo percorrendo os nós terminais em direção à subestação, e vice-versa.

A primeira etapa do processo de varredura consiste na renumeração dos ramos do sistema em camadas, onde os ramos de uma camada devem ser renumerados antes de passar para a camada seguinte. Essa divisão entre camadas é feita considerando-se os ramos ligados à subestação como a primeira camada; a próxima camada são os ramos conectados à primeira e as demais camadas são montadas obedecendo esta mesma lógica. Shirmohammadi et al. (1988) divide o sistema de 14 nós em camadas, conforme as Figuras 2 e 3.

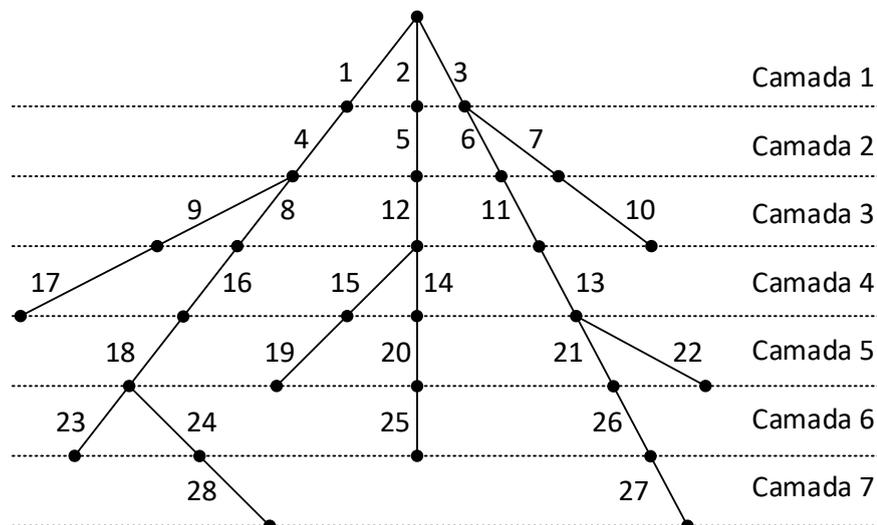
O processo iterativo inicia-se estabelecendo um valor para tensão nos nós, na forma fasorial. Geralmente, é adotada a mesma tensão do nó da subestação, isto é, para todo nó i do sistema, parte-se da premissa de que $\dot{V}_i^{(0)} = V^{nom}$, onde V^{nom} corresponde a magnitude da tensão na subestação. Com a definição dos valores de tensões nos nós, deve-se em seguida determinar as correntes nas cargas e nos nós e as correntes nos ramos do sistema radial, em um processo denominado *backward*. Com os valores das correntes nos ramos pode-se calcular de forma aproximada as perdas no sistema e também a corrente que está saindo da subestação.

Figura 2 – Sistema de distribuição radial



Fonte: Shirmohammadi et al. (1988).

Figura 3 – Sistema de distribuição radial por camadas



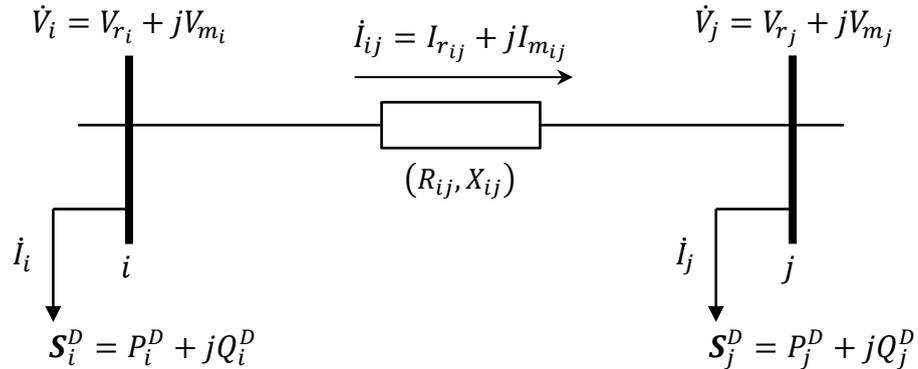
Fonte: Shirmohammadi et al. (1988).

Os valores de corrente determinados na etapa de *backward* então são utilizados para encontrar os novos valores de tensão nos nós do sistema, iniciando da subestação, em um processo chamado *forward*. Com base nestes valores de tensão, pode-se atualizar os valores para as correntes nos nós e nos ramos da rede, usados na sequência para renovação dos valores das perdas e tensões nos nós. O algoritmo para quando a variação das perdas ativas entre duas iterações consecutivas, $|\Delta P_{ls}|$, são menores do que uma tolerância especificada ε .

2.1.1. Cálculo das correntes nos ramos

A seguir são deduzidas as expressões utilizadas na etapa *backward* do fluxo de potência para redes radiais, com base no sistema apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Parte de um sistema de distribuição radial



Fonte: Possagnolo (2015).

Na Figura 4, \dot{V}_i é o fasor tensão no nó i , separado em partes real e imaginária, V_{r_i} e V_{m_i} , nesta ordem; \dot{I}_i é o fasor corrente de carga no nó i , S_i^D é a potência complexa demandada no nó i , formada por P_i^D e Q_i^D , as potências ativa e reativa, respectivamente; R_{ij} e X_{ij} são, respectivamente, a resistência e reatância do ramo ij ; e \dot{I}_{ij} é a corrente fluindo no ramo ij .

Para obtenção das expressões das correntes, são apresentadas a seguir as deduções em coordenadas retangulares.

A demanda de potência complexa no nó i , S_i^D bem como a tensão no nó i , na iteração $k - 1$, $\dot{V}_i^{(k-1)}$, podem ser representadas pelas equações (1) e (2).

$$S_i^D = P_i^D + jQ_i^D \quad (1)$$

$$\dot{V}_i^{(k-1)} = V_{r_i}^{(k-1)} + jV_{m_i}^{(k-1)} \quad (2)$$

Conhecendo então a potência aparente e a tensão no nó i , pode-se determinar a corrente de carga absorvida no nó i , $\dot{I}_i^{(k)}$ pela equação (3).

$$\dot{I}_i^{(k)} = \left(\frac{S_i^D}{\dot{V}_i^{(k-1)}} \right)^* \quad (3)$$

Substituindo (1) e (2) em (3), tem-se (4).

$$\dot{i}_i^{(k)} = \left(\frac{P_i^D + jQ_i^D}{V_{r_i}^{(k-1)} + jV_{m_i}^{(k-1)}} \right)^* = \left(\frac{P_i^D + jQ_i^D}{V_{r_i}^{(k-1)} + jV_{m_i}^{(k-1)}} \frac{V_{r_i}^{(k-1)} - jV_{m_i}^{(k-1)}}{V_{r_i}^{(k-1)} + jV_{m_i}^{(k-1)}} \right)^* \quad (4)$$

Desenvolvendo-se a expressão obtida em (4) chega-se na equação (5).

$$\dot{i}_i^{(k)} = \frac{\left(P_i^D V_{r_i}^{(k-1)} + Q_i^D V_{m_i}^{(k-1)} \right) + j \left(P_i^D V_{m_i}^{(k-1)} + Q_i^D V_{r_i}^{(k-1)} \right)}{\left(V_{r_i}^{(k-1)} \right)^2 + \left(V_{m_i}^{(k-1)} \right)^2} \quad (5)$$

Separando a equação (5) em $I_{r_i}^{(k)}$ e $I_{m_i}^{(k)}$, respectivamente as partes real e imaginária do fasor corrente de carga no nó i , tem-se as equações (6) e (7).

$$I_{r_i}^{(k)} = \frac{P_i^D V_{r_i}^{(k-1)} + Q_i^D V_{m_i}^{(k-1)}}{\left(V_{r_i}^{(k-1)} \right)^2 + \left(V_{m_i}^{(k-1)} \right)^2} \quad (6)$$

$$I_{m_i}^{(k)} = \frac{P_i^D V_{m_i}^{(k-1)} + Q_i^D V_{r_i}^{(k-1)}}{\left(V_{r_i}^{(k-1)} \right)^2 + \left(V_{m_i}^{(k-1)} \right)^2} \quad (7)$$

O fasor corrente no ramo ij , na iteração k , pode ser formulado por (8).

$$\dot{i}_{ij}^{(k)} = I_{r_{ij}}^{(k)} + jI_{m_{ij}}^{(k)} \quad (8)$$

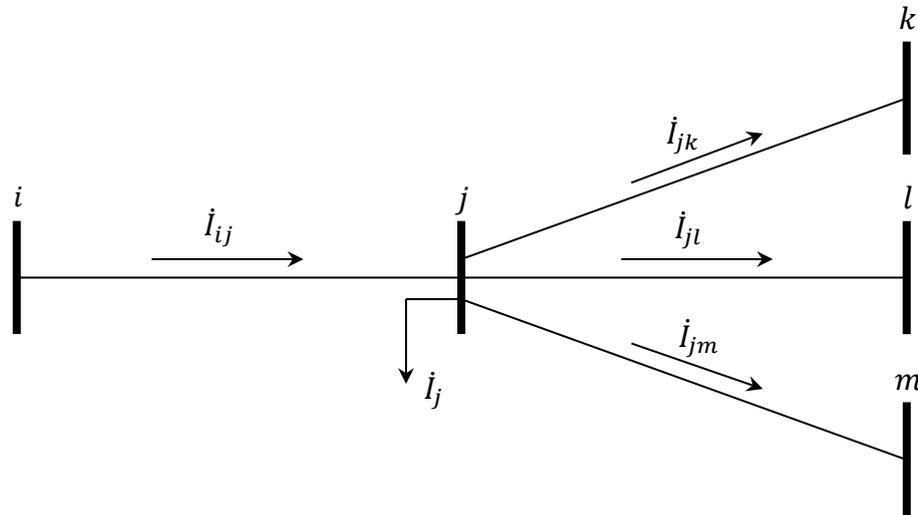
Onde $I_{r_{ij}}^{(k)}$ e $I_{m_{ij}}^{(k)}$ são, respectivamente, as partes real e imaginária da corrente fluindo no ramo ij na iteração k .

De forma geral, o cálculo das correntes nos ramos é dado pela equação (9) abaixo.

$$\dot{i}_{ij}^{(k)} = \dot{i}_j^{(k)} + \sum_{j'l \in \Omega_l} \dot{i}_{jl}^{(k)} \quad (9)$$

A equação (9) é utilizada para calcular as correntes nos ramos na etapa de *backward* do fluxo de potência. Para cada ramo ij , com j sendo o nó mais afastado da subestação em cada ramo e $\dot{i}_j^{(k)}$ o fasor corrente de carga no nó j na iteração k , a corrente $\dot{i}_{ij}^{(k)}$ é dada pela soma dos fluxos de correntes dos ramos conectados ao nó j e pertencentes às camadas inferiores, na iteração k . Na Figura 5 a seguir ilustra-se o processo da soma das correntes na etapa *backward*.

Figura 5 – Soma das correntes no método de varredura



Fonte: Possagnolo (2015).

2.1.2. Cálculo das tensões nos nós

As tensões nos nós do sistema são calculadas durante o processo *forward*. A partir da Figura 4, a tensão no nó j é calculada a com base na tensão do nó i , mais próximo da subestação. De forma genérica, pode-se deduzir a expressão da tensão no nó j em função da tensão no nó i , em coordenadas retangulares, conforme mostrado nas equações (10), (11), (12) e (13).

Nas equações (10) e (11), é equacionada a tensão fasorial no nó i , na k -ésima iteração.

$$\dot{V}_i^{(k)} = V_{r_i}^{(k)} + jV_{m_i}^{(k)} = \dot{V}_j^{(k)} + (R_{ij} + X_{ij}) (I_{r_{ij}}^{(k)} + jI_{m_{ij}}^{(k)}) \quad (10)$$

$$V_{r_i}^{(k)} + jV_{m_i}^{(k)} = V_{r_j}^{(k)} + jV_{m_j}^{(k)} + (R_{ij}I_{r_{ij}}^{(k)} - X_{ij}I_{m_{ij}}^{(k)}) + j(R_{ij}I_{m_{ij}}^{(k)} - X_{ij}I_{r_{ij}}^{(k)}) \quad (11)$$

Separando as partes real e imaginária, obtém-se as expressões procuradas, apresentadas em (12) e (13).

$$V_{r_j}^{(k)} = V_{r_i}^{(k)} - R_{ij}I_{r_{ij}}^{(k)} + X_{ij}I_{m_{ij}}^{(k)} \quad (12)$$

$$V_{m_j}^{(k)} = V_{m_i}^{(k)} - R_{ij}I_{m_{ij}}^{(k)} - X_{ij}I_{r_{ij}}^{(k)} \quad (13)$$

As equações (12) e (13) devem ser aplicadas da primeira para a última camada no processo *forward*.

2.1.3. Cálculo das perdas

Com as correntes e tensões calculadas nas etapas anteriores, ficam determinadas as perdas ativas e reativas nas linhas do sistema, na iteração k , $P_{ls_{ij}}^{(k)}$ e $Q_{ls_{ij}}^{(k)}$, respectivamente. Estas perdas, podem ser calculadas conforme mostrado em (14) e (15).

$$P_{ls_{ij}}^{(k)} = R_{ij} \left(I_{ij}^{(k)} \right)^2 \quad (14)$$

$$Q_{ls_{ij}}^{(k)} = X_{ij} \left(I_{ij}^{(k)} \right)^2 \quad (15)$$

Na iteração k , o valor total das perdas de potência ativa e reativa no sistema são representadas por (16) e (17), nesta ordem.

$$P_{ls}^{(k)} = \sum_{ij \in \Omega_l} R_{ij} \left(I_{ij}^{(k)} \right)^2 \quad (16)$$

$$Q_{ls}^{(k)} = \sum_{ij \in \Omega_l} X_{ij} \left(I_{ij}^{(k)} \right)^2 \quad (17)$$

Na Figura 6 é apresentado o fluxograma do método varredura do algoritmo de fluxo de potência para redes radiais.

2.2. Fluxo de potência para redes fracamente malhadas

Na Figura 7 ilustra-se uma rede de distribuição fracamente malhada, com três malhas. Para este caso, o método de varredura apresentado anteriormente não pode ser aplicado diretamente. Para contornar este problema, pode-se seccionar o sistema em *breakpoints*, convertendo-o em uma rede radial. Embora a criação destes *breakpoints* gere interrupções nas correntes fluindo nos ramos, elas podem ser substituídas injetando-se correntes em ambos os nós terminais, sem afetar a operação do sistema. Assim, fica permitido à aplicação do algoritmo de varredura descrito anteriormente.

Na iteração k do fluxo de potência para redes radiais, a corrente no *breakpoint* j , $\dot{I}_j^{(k)}$, deve ser aplicada com sinais opostos em ambos os nós, de acordo com as equações (18) e (19).

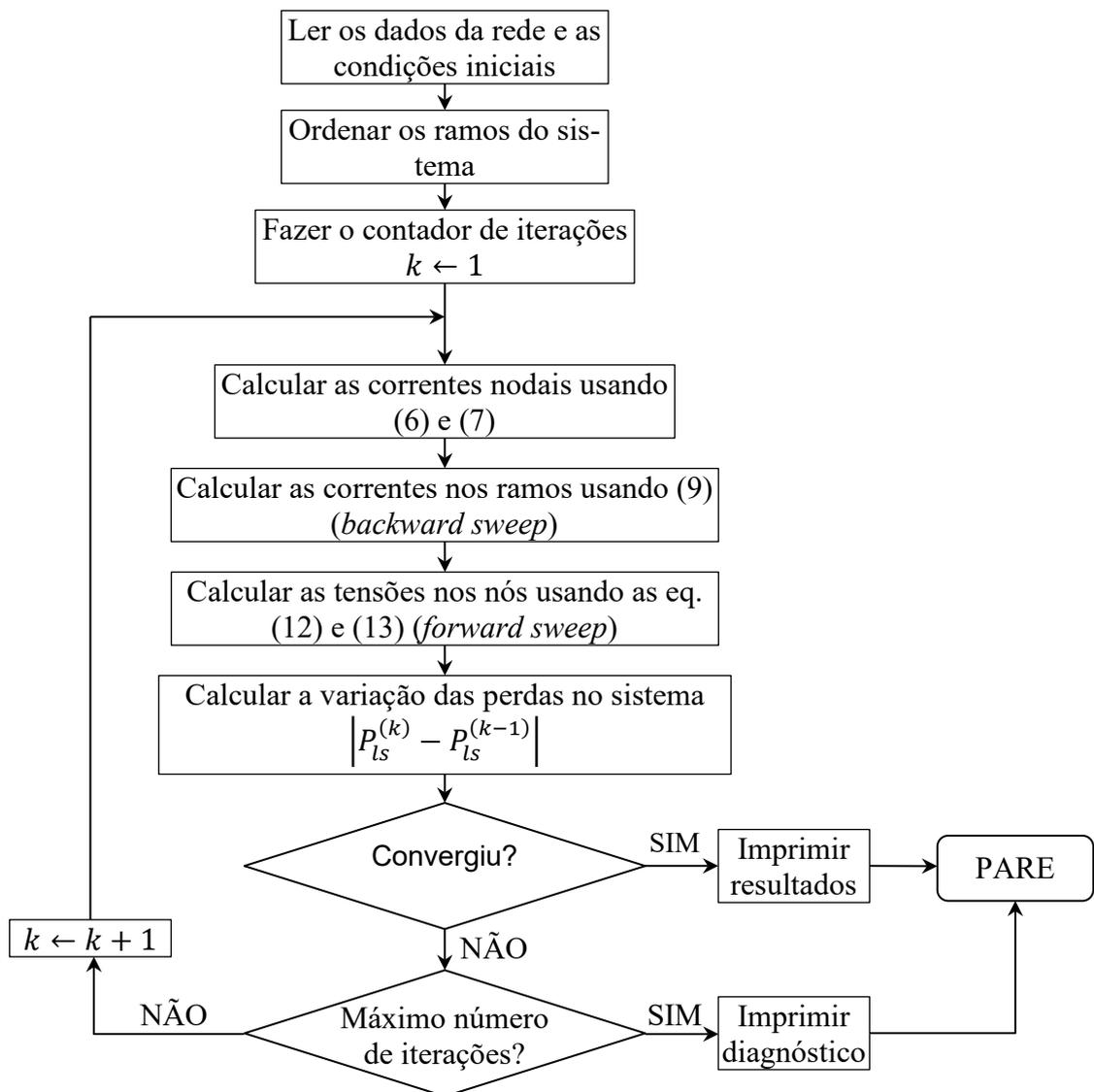
$$\dot{I}_{j1}^{(k)} = -\dot{I}_j^{(k)} \quad j = 1, 2, \dots, p \quad (18)$$

$$\dot{I}_{j2}^{(k)} = \dot{I}_j^{(k)} \quad j = 1, 2, \dots, p \quad (19)$$

Onde $j1$ e $j2$ correspondem aos dois nós terminais do *breakpoint* j , $\dot{I}_{j1}^{(k)}$ e $\dot{I}_{j2}^{(k)}$

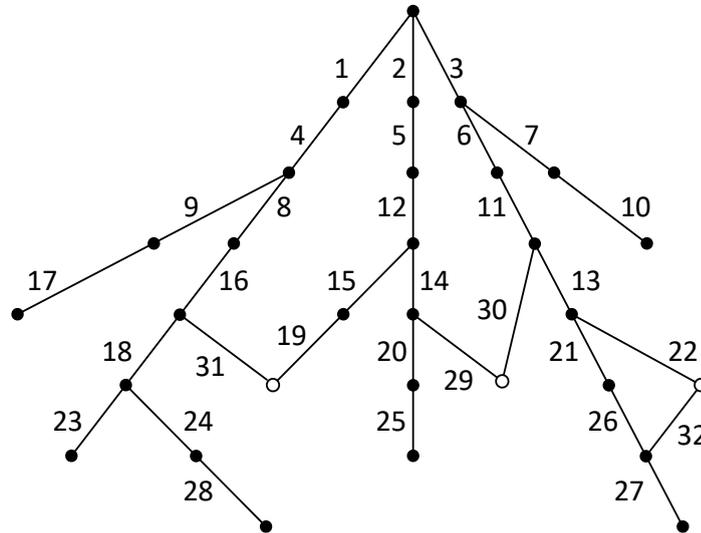
são as injeções de corrente nestes nós na k -ésima iteração, $i_j^{(k)}$ é a corrente no *breakpoint* j , na iteração k , e p é a quantidade de *breakpoints* (POSSAGNOLO, 2015). Caso haja correntes nodais nos nós de *breakpoints*, causadas por possíveis cargas e elementos *shunt* ligados à rede, $I_j^{(k)}$ e $-I_j^{(k)}$ devem ser adicionados às correntes nodais. Após a atualização de $I_{j1}^{(k)}$ e $I_{j2}^{(k)}$, os processos *backward* e *forward* podem ser aplicados diretamente (SHIRMOHAMMADI et al., 1988). Na Figura 8 mostra-se o esquema de injeções de correntes nos nós terminais do *breakpoint*.

Figura 6 – Método de varredura para fluxo de potência de sistemas radiais

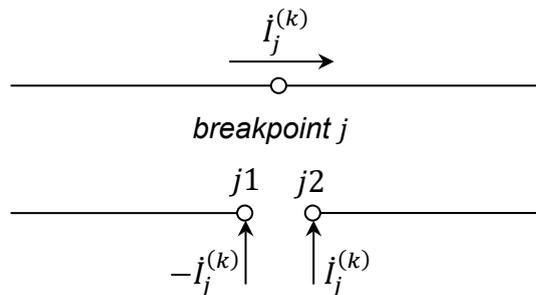


Fonte: Shirmohammadi et al. (1988).

Figura 7 – Sistema de distribuição fracamente malhado



Fonte: Shirmohammadi et al. (1988).

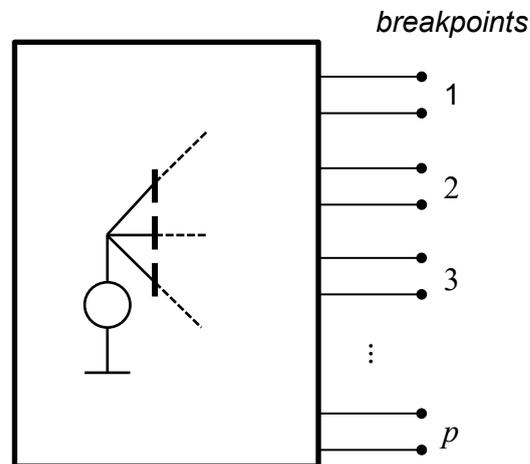
Figura 8 – *Breakpoint* com injeções de correntes nodais

Fonte: Shirmohammadi et al. (1988).

2.2.1. Correntes nos *breakpoints* pelo método de compensação

Tinney (1972) formula um método para calcular as correntes nos *breakpoints*, conhecido como compensação multiporta. Na Figura 9 é mostrado o conceito desta abordagem. A rede radial obtida da abertura dos *breakpoints* é representada por um circuito multiporta, onde cada nó dos *breakpoints* corresponde à uma porta do sistema. O cálculo das correntes nos *breakpoints* requer a montagem do circuito equivalente multiporta para a rede radial, visto pelas portas dos breakpoints. (SHIRMOHAMMADI et al., 1988).

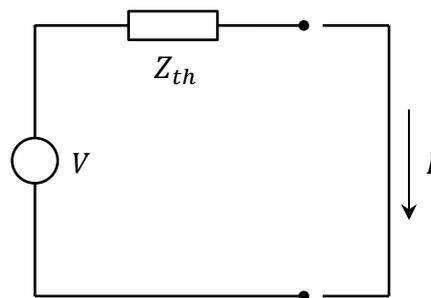
Figura 9 – Modelo multiporta da rede radial visto pelos *breakpoints*



Fonte: Shirmohammadi et al. (1988).

Caso a rede seja linear, este modelo é o circuito equivalente de Thévenin observado pelos nós dos *breakpoints*, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Equivalente de Thévenin da rede radial pelos nós dos *breakpoints*



Fonte: Shirmohammadi et al. (1988).

onde V é o vetor $p \times 1$ de tensões de circuito aberto nos *breakpoints*, obtidas da resolução do fluxo de potência radial; Z_{th} é a matriz $p \times p$ das impedâncias observadas pelos *breakpoints*; e I é o vetor $p \times 1$ das correntes de *breakpoints* que se deseja obter. Logo, o circuito da Figura 10 pode ser representado por (20).

$$V = Z_{th}I \quad (20)$$

Porém, para os casos em que a potência de possíveis cargas acopladas à rede é constante, a rede torna-se não linear, não sendo permitido aplicar a equação (20)

diretamente (SHIRMOHAMMADI et al., 1988) e neste caso, as correntes nos *breakpoints* devem ser calculadas de forma iterativa, por meio do equivalente de Thévenin.

2.2.2. Matriz de impedâncias equivalentes vistas pelos *breakpoints*

A seguir é apresentada a matriz de impedâncias equivalentes de Thévenin e como ela pode ser determinada.

A equação (20) pode ser representada em sua forma matricial de acordo com (21).

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \vdots \\ \dot{V}_j \\ \vdots \\ \dot{V}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{11} & \dots & \bar{Z}_{1j} & \dots & \bar{Z}_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{Z}_{j1} & \dots & \bar{Z}_{jj} & \dots & \bar{Z}_{jp} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{Z}_{p1} & \dots & \bar{Z}_{pj} & \dots & \bar{Z}_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \vdots \\ \dot{I}_j \\ \vdots \\ \dot{I}_p \end{bmatrix} \quad (21)$$

onde $\bar{Z}_{ij} = R_{ij} + jX_{ij}$.

De acordo com (21), para os casos em que $\dot{I}_j = 1 + j0$ p.u. e $\dot{I}_i = 0$, $i = 1, 2, \dots, p$ e $i \neq j$, a coluna j da matriz de impedâncias será equivalente ao vetor de tensões, o que corresponde a injetar uma corrente de valor unitário em p.u. no *breakpoint* j com todas as cargas e a fonte no nó raiz retiradas. Na prática, isto representa injetar correntes de polaridades contrárias e magnitudes 1 p.u. e nos nós terminais do *breakpoint* j . As tensões nos *breakpoints* podem ser calculadas pela subtração das tensões nos dois nós terminais de cada *breakpoint*. As iterações param no momento em que são preenchidas todas as colunas da matriz de impedâncias.

2.2.3. Processo iterativo de compensação

Abaixo, é apresentado o processo iterativo do método de compensação proposto por Shirmohammadi et al. (1988) para cálculo das correntes nos *breakpoints* por meio do equivalente de Thévenin

- i. Monte a matriz de impedâncias equivalentes de Thévenin, Z_{th} , observadas pelos *breakpoints*. Essa matriz deve ser mantida constante durante todo o processo de compensação;
- ii. Calcule o vetor de tensões equivalentes de Thévenin, V , nos *breakpoints*

da rede radial por meio dos procedimentos *backward* e *forward*. Inclua as correntes nos *breakpoints* determinadas na iteração anterior do método de compensação. Inicialmente, o valor das correntes nos *breakpoints* é zero;

- iii. Por meio do equivalente de Thévenin, calcule o incremento das correntes nos *breakpoints*. Para a iteração k do método de compensação, tem-se que esse incremento é obtido por (22).

$$\Delta I^{(k)} = \frac{1}{Z_{th}} V^{(k)} \quad (22)$$

A equação (22) pode ser representada na forma matricial conforme (23).

$$\begin{bmatrix} \Delta I_r^{(k)} \\ \Delta I_m^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{th}^r & -Z_{th}^m \\ Z_{th}^m & Z_{th}^r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta V_r^{(k)} \\ \Delta V_m^{(k)} \end{bmatrix} \quad (23)$$

Onde $\Delta I_r^{(k)}$ e $\Delta I_m^{(k)}$ representam as partes real e imaginária do vetor $\Delta I^{(k)}$; $\Delta V_r^{(k)}$ e $\Delta V_m^{(k)}$ são as partes real e imaginária do vetor $V^{(k)}$; e Z_{th}^r e Z_{th}^m são matrizes constituindo as partes real e imaginária da matriz Z_{th} ;

- iv. Atualize as correntes nos *breakpoints* com os incrementos obtidos por (22), conforme (24).

$$I^{(k)} = I^{(k-1)} + \Delta I^{(k)} \quad (24)$$

Reescrevendo (24) em sua forma matricial, obtém-se (25).

$$\begin{bmatrix} I_r^{(k)} \\ I_m^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_r^{(k-1)} \\ I_m^{(k-1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta I_r^{(k)} \\ \Delta I_m^{(k)} \end{bmatrix} \quad (25)$$

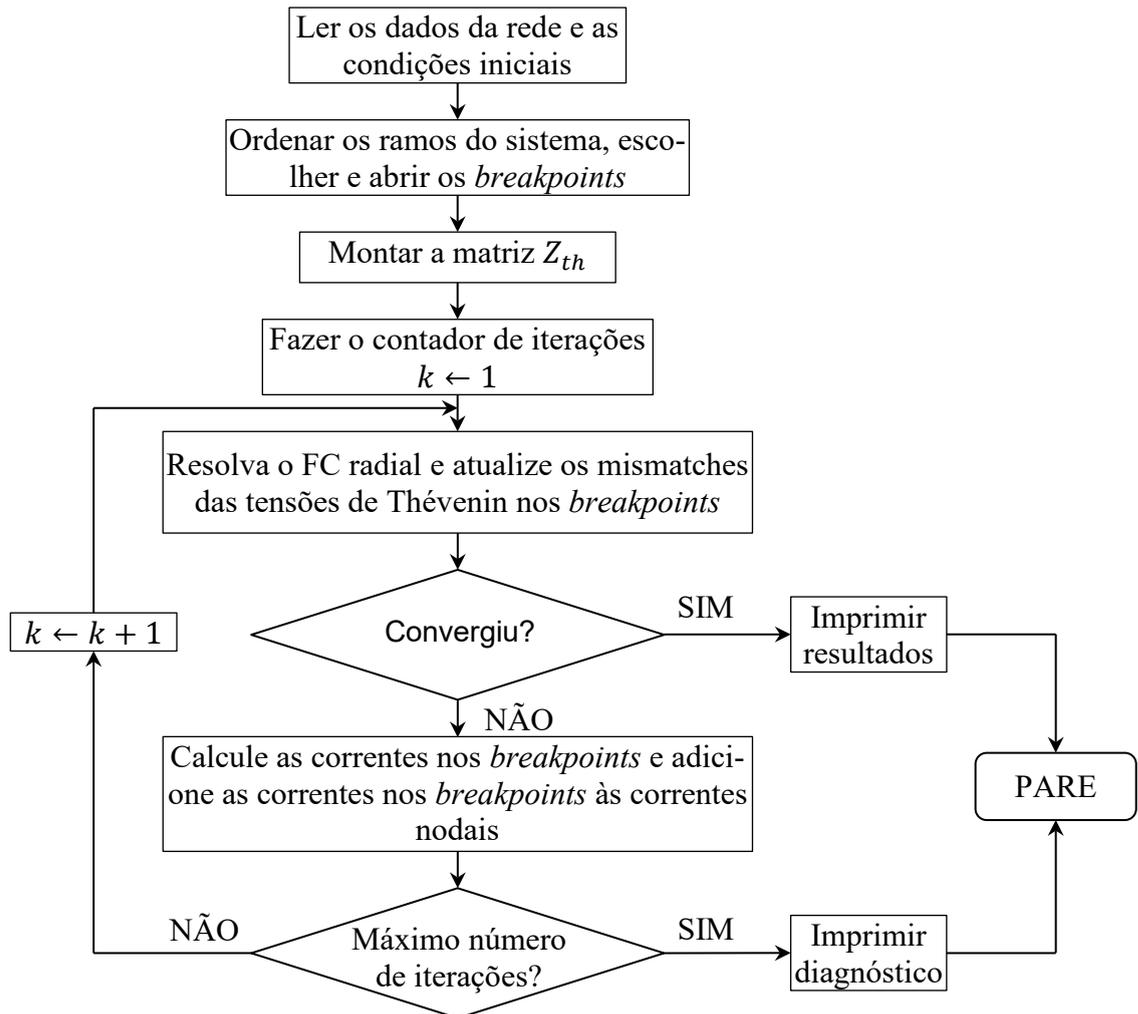
Onde $I_r^{(k)}$ e $I_m^{(k)}$ representam as partes real e imaginária do vetor $I^{(k)}$, respectivamente;

- v. Repita novamente as etapas (i), (iii) e (iv) até que o critério de convergência seja atingido (a tensão máxima obtida no passo (ii) deve estar dentro da especificação $\max|\Delta V^{(k)}| < \varepsilon$).

Conforme o número de malhas do sistema aumenta, a eficiência deste método

cai. Na Figura 11 é ilustrado o fluxograma do cálculo realizado pelo algoritmo de fluxo de potência para redes fracamente malhadas.

Figura 11 – Fluxo de potência para redes fracamente malhadas



Fonte: Shirmohammadi et al. (1988).

2.2.4. Escolha dos *breakpoints*

O objetivo de utilizar os *breakpoints* no fluxo de potência para redes fracamente malhadas é transformar a rede malhada em um sistema radial. A escolha deles deve ser feita de maneira que seja alcançada a convergência do método de resolução do algoritmo e, para satisfazer esse requisito, os *breakpoints* selecionados concentram-se na parte da rede com baixos fluxos de potência. Entretanto, os valores de fluxo são desconhecidos no momento das escolhas, já que são calculados no final do método

de solução.

Para redes fracamente malhadas, os *breakpoints* escolhidos não afetam de forma considerável o desempenho do método. Logo, neste trabalho as escolhas são feitas com o principal objetivo de eliminar as malhas do sistema, sendo o algoritmo para definição dos *breakpoints* simples e integrado no algoritmo de renumeração dos ramos. A seguir, é apresentado o algoritmo (SHIRMOHAMMADI et al., 1988).

- i. Analisar todos os ramos. Para formar a primeira camada, devem ser selecionados aqueles conectados ao nó raiz;
- ii. Guardar o número referente ao nó mais afastado do nó raiz da camada formada e marcar com um *flag* todos estes nós, indicando suas utilizações;
- iii. Analisar os ramos que restam e escolher aqueles conectados a qualquer um dos nós mais afastados do nó raiz da camada formada. Esses ramos serão colocados na camada seguinte;
- iv. Caso o ramo numerado no passo (iii) apresente um nó terminal com a *flag* de que já foi usado anteriormente, um laço foi formado e um *breakpoint* deve ser criado neste nó;
- v. Refaça os passos (ii), (iii) e (iv) até que se percorram todos os ramos da rede.

2.3. Estratégia Heurística

A estratégia heurística apresentada neste trabalho baseia-se nas seguintes premissas:

- A quantidade de topologias radiais de um sistema de distribuição depende estritamente do número de ramos livres para manobra. Por exemplo, na rede ilustrada na Figura 1, se todos os ramos, exceto x_5 , x_9 , x_{15} e x_{16} , forem mantidos fixos e conectados, o número de topologias radiais é reduzido de 190 para 2;
- Na heurística construtiva apresentada por Merlin e Back (1975), em que

um ramo é removido a cada passo, os primeiros ramos, geralmente, são removidos de maneira ótima. Seguindo o mesmo princípio, no algoritmo de Prim, onde os ramos de maiores fluxos são inseridos a cada passo, os primeiros ramos são adicionados de forma ótima. Trata-se de uma característica comum da maioria dos algoritmos construtivos: as primeiras decisões são ótimas, as tomadas em passos intermediários podem levar a decisões não ótimas, e nos últimos passos, a estratégia fundamental na qual a lógica construtiva é baseada perde eficiência, produzindo frequentemente soluções diferentes do ótimo global.

Considerando as premissas mencionadas anteriormente, a proposta elaborada neste trabalho consiste em implementar inicialmente a heurística de Prim, a fim de ordenar os ramos de maior fluxo de potência, que serão incorporados à rede. Desse modo, os primeiros k_1 ramos podem ser definitivamente fixados e conectados. Em seguida, deve-se identificar as topologias radiais possíveis de se formarem com os ramos livres e resolver um fluxo de potência radial para cada solução identificada, encontrando a melhor dentre elas. Em suma, o método encontra a melhor topologia radial entre aquelas que apresentam os k_1 ramos fixos e sempre fechados. O valor de k_1 pode ser escolhido de acordo com o número de fluxos de potência para redes radiais que se pretende resolver. Quando $k_1 = 0$, a heurística se transforma na estratégia de força bruta apresentada por Morton e Mareels (2000); já quando $k_1 = n^b - 1$, a proposta se transforma na heurística de Prim.

2.4. Algoritmo de Prim para fixar os ramos fechados

Levando em conta as características de cada meta-heurística, uma solução inicial pode ser gerada de três formas diferentes: (a) aleatoriamente; (b) utilizando uma estratégia aleatória controlada; (c) por meio de uma heurística construtiva. Entretanto, a solução inicial deve necessariamente obedecer a restrição de radialidade.

Uma das melhores estratégias para produção de soluções radiais é utilizar o algoritmo de Prim, que fornece uma árvore geradora para o problema, considerando que os pesos de cada aresta do grafo são previamente conhecidos. Este algoritmo sempre fornecerá a solução ótima. Para o problema da reconfiguração de redes de distribuição, os pesos das arestas são as perdas ativas. Conhecendo-as, é possível

aplicar este algoritmo e desta forma obter a topologia radial ótima. Porém, para a reconfiguração, esta informação é desconhecida, pois as perdas ativas de cada ramo variam de acordo com cada topologia radial. É feita então uma modificação neste algoritmo para gerar uma topologia radial para o sistema de distribuição, onde, considerando um problema de máximo custo, escolhe-se o peso de cada ramo gerando uma lista de prioridade em que os ramos de maior peso são inseridos na rede. Para tanto, inicialmente, todos os ramos do sistema devem ser mantidos conectados e resolve-se um fluxo de potência para redes fracamente malhadas (SHIRMOHAMMADI et al., 1988).

O resultado deste fluxo de potência, fornece as potências aparentes de todos ramos do sistema, usadas como peso no algoritmo de Prim. Em seguida, considera-se todos ramos desconectados e, com base na premissa apresentada por Merlin e Back (1975), que afirma que configuração com as mínimas perdas deve perturbar o mínimo possível os fluxos de potência aparente nos ramos de um sistema de distribuição quando comparada à topologia totalmente malhada, em cada fase do algoritmo modificado de Prim, o ramo que apresenta o maior fluxo de potência é adicionado à rede.

Desta forma, o algoritmo incorpora os k_1 ramos que serão fixados na próxima etapa. Para evitar a formação de laços no sistema, o algoritmo de Prim primeiramente desmarca todos os nós e marca o nó da subestação. A cada etapa, é adicionado à rede o ramo que apresenta o maior fluxo de potência aparente e que tenha um nó terminal marcado e o outro nó desmarcado. Por fim, é marcado o nó terminal do ramo que foi incorporado. Uma das vantagens de se usar o algoritmo de Prim é a necessidade de resolver somente um fluxo de potência para redes fracamente malhadas nesta etapa para gerar soluções radiais de boa qualidade (TELES; MACEDO; ROMERO, 2020).

Uma solução de boa qualidade pode ser encontrada de forma mais rápida por meio de heurísticas mais elaboradas (MACEDO et al., 2018).

O algoritmo modificado de Prim é apresentado de forma resumida a seguir:

Dados de entrada do problema: Resultado do fluxo de potência para redes fracamente malhadas e topologia da rede.

Etapa 1: Inicialmente, todos os nós são desmarcados e todos os ramos desconectados. Marque apenas o nó da subestação.

Para $i = 1$ até $k_1 = n^b - 1$

1. Escolha o ramo que apresente o maior fluxo e tenha um nó terminal marcado e o outro nó terminal desmarcado;
2. Adicione esse ramo ao grupo de ramos que serão considerados fixos e conectados;
3. Para o ramo incluído, marque o nó terminal desmarcado.

2.5. Método para determinação das soluções radiais

Harris, Hirst e Mossinghoff (2008) descrevem um método para determinar a quantidade de árvores geradoras de um grafo e outro, que possibilita determinar quais são essas árvores geradoras.

Para obter a quantidade de topologias radiais existentes em um sistema de distribuição, deve-se calcular o determinante de uma matriz denominada matriz Laplaciana, L , de ordem n^b , onde n^b é o número de nós do sistema de distribuição. Os elementos desta matriz são definidos conforme apresentado em (26).

$$l_{i,j} = \begin{cases} grau(i) & \text{se } i = j \\ -1 & \text{se } i \neq j \text{ e existe um ramo entre } i \text{ e } j \\ 0 & \text{em caso contrário} \end{cases} \quad (26)$$

Sendo o $grau(i)$ a quantidade de ramos conectados ao nó i . Macedo et al. (2018) desenvolve a matriz Laplaciana para o sistema de 14 nós apresentado na Figura 1, que é apresentada na Figura 12. As entradas com valor 0 foram omitidas.

O número de topologias radiais do sistema fica determinado calculando-se qualquer cofator da matriz L . Desta forma, eliminando-se, por exemplo, a primeira linha e a primeira coluna da matriz e resolvendo o determinante da matriz reduzida, encontra-se a quantidade de topologias radiais possíveis no sistema. Pode ser verificado para esse exemplo que $|\det(L)| = 190$. Conhecer o número de topologias existentes para uma rede é importante para que se tenha ideia do tamanho do espaço de busca e assim seja possível desenvolver estratégias de busca mais efetivas.

Figura 12 – Matriz Laplaciana para o sistema de 14 nós

$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	3	-1				-1			-1					
2	-1	3	-1								-1			
3		-1	2	-1										
4			-1	2	-1									
5				-1	3	-1				-1				
6	-1				-1	3	-1							
7						-1	2	-1						
8							-1	2	-1					
9	-1							-1	3					-1
10					-1					1				
11		-1									2	-1		
12											-1	2	-1	
13												-1	2	-1
14									-1				-1	2

Fonte: Macedo et al. (2018).

A extensão dessa proposta, fornece facilmente quais são as topologias radiais da rede. Assim, inicialmente, para cada ramo do sistema é atribuída uma variável, conforme apresentado na Figura 1 ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_{16}$). Logo, a matriz Laplaciana estendida pode ser construída colocando na diagonal principal o elemento $l_{i,j}$ representando a soma das variáveis dos ramos ligados ao nó i e os demais elementos fora da diagonal principal pelo negativo da variável atribuída ao ramo que conecta os nós i e j . Por meio do cálculo de qualquer cofator dessa matriz estendida, obtém-se um polinômio, composto de monômios que indicam uma topologia radial da rede. Na Figura 13 ilustra-se a matriz estendida para a rede da Figura 1, em que s_i é a soma das variáveis que correspondentes aos ramos conectados ao nó i , e.g., $s_1 = x_1 + x_2 + x_3$, $s_2 = x_1 + x_4 + x_{12}$, $s_3 = x_4 + x_5$ etc.

Figura 13 – Matriz Laplaciana estendida para o sistema de 14 nós

$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	s_1	$-x_1$				$-x_2$			$-x_3$					
2	$-x_1$	s_2	$-x_4$								$-x_{12}$			
3		$-x_4$	s_3	$-x_5$										
4			$-x_5$	s_4	$-x_6$									
5				$-x_6$	s_5	$-x_7$				$-x_{11}$				
6	$-x_2$				$-x_7$	s_6	$-x_8$							
7						$-x_8$	s_7	$-x_9$						
8							$-x_9$	s_8	$-x_{10}$					
9	$-x_3$							$-x_{10}$	s_9					$-x_{13}$
10					$-x_{11}$					s_{10}				
11		$-x_{12}$									s_{11}	$-x_{14}$		
12											$-x_{14}$	s_{12}	$-x_{15}$	
13												$-x_{15}$	s_{13}	$-x_{16}$
14									$-x_{13}$				$-x_{16}$	s_{14}

Fonte: Macedo et al. (2018).

2.6. Algoritmo para formação da matriz Laplaciana reduzida

Anteriormente, foi apresentada uma estratégia para o cálculo do número de topologias radiais de um sistema de distribuição bem como a obtenção de todas elas, considerando para isso que todos os ramos são livres. Por outro lado, no contexto deste trabalho, a ideia é considerar os k_1 ramos indicados pelo algoritmo de Prim sempre fixos e conectados, de maneira a obter todas as soluções radiais que existam com esses ramos sempre energizados. Desta forma, tanto a matriz Laplaciana para o cálculo da quantidade de topologias radiais da rede, mostrada na Figura 12, quanto a Matriz Laplaciana modificada para enumeração das soluções, ilustrada na Figura 13, devem ser modificadas.

Para elaboração do algoritmo que permite a redução dessas matrizes no caso de alguns ramos serem mantidos sempre fechados, considera-se a formação de supernós, isto é, conjuntos de nós. Estes supernós são interconectados por ramos mantidos fixos no sistema. Assim, por exemplo, ao se considerar o ramo ligando o nó 5 ao nó 6 no sistema de 14 nós da Figura 1, os nós 5 e 6 formam um supernó, que pode ser enumerado como o nó de menor valor (TELES; MACEDO; ROMERO, 2020). Logo, o nó 6 sai do sistema, permanecendo o nó 5.

Figura 14 – Matriz Laplaciana na primeira etapa de redução

$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	3	-1				-1			-1					
2	-1	3	-1								-1			
3		-1	2	-1										
4			-1	2	-1									
5				-1	3	-1				-1				
6	-1				-1	3	-1							
7						-1	2	-1						
8							-1	2	-1					
9	-1							-1	3					-1
10					-1					1				
11		-1									2	-1		
12											-1	2	-1	
13												-1	2	-1
14									-1				-1	2

Fonte: Teles, Macedo e Romero. (2020)

Para reduzir a matriz L , devem-se seguir estas operações: identificar as linhas e colunas do nó que irá permanecer e do nó que irá sair e realizar a soma da linha e da coluna que correspondem ao nó que irá permanecer à linha e a coluna do nó que irá ser removido. As Figuras 14, 15 e 16 mostram esse passo a passo considerando que

o ramo 5–6 é fixado. Na Figura 14, as linhas e colunas referentes aos nós 5 e 6, são destacadas em azul e vermelho, respectivamente. Na Figura 15 é realizada a soma dos elementos da linha 5 com a linha 6 e a soma dos elementos da coluna 5 com a coluna 6 e então, a linha e a coluna referentes ao nó 6 são removidos da matriz L . Na Figura 16, a matriz L é reestruturada com os nós que restaram, inclusive o supernó 5. Pode-se notar que a matriz reduzida na terceira etapa possui quatro ramos vinculados ao supernó 5, sendo eles os ramos 1–5, 4–5, 5–7 e 5–10, conforme é possível visualizar pela Figura 1. Ainda, as mesmas operações aplicadas sobre a matriz Laplaciana L , podem ser aplicadas à matriz L estendida.

Figura 15 – Soma das linhas e colunas dos nós 5 e 6

	j													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
i														
1	3	-1			-1				-1					
2	-1	3	-1							-1				
3		-1	2	-1										
4			-1	2	-1									
5	-1			-1	4		-1			-1				
6														
7						-1	2	-1						
8							-1	2	-1					
9	-1							-1	3					-1
10					-1					1				
11			-1								2	-1		
12											-1	2	-1	
13												-1	2	-1
14													-1	2

$L =$

Fonte: Teles, Macedo e Romero. (2020).

Figura 16 – Matriz Laplaciana após eliminar formação do supernó 5

$i \backslash j$	1	2	3	4	5	7	8	9	10	11	12	13	14
1	3	-1			-1			-1					
2	-1	3	-1							-1			
3		-1	2	-1									
4			-1	2	-1								
5	-1			-1	4	-1			-1				
7					-1	2	-1						
8						-1	2	-1					
9	-1						-1	3					-1
10					-1				1				
11		-1								2	-1		
12										-1	2	-1	
13											-1	2	-1
14								-1				-1	2

Fonte: Teles, Macedo e Romero. (2020).

2.7. Algoritmo Heurístico proposto

Para resolução do problema de reconfiguração ótima de sistemas de distribuição, a estratégia elaborada começa com uma etapa de pré-processamento, onde é executado um fluxo de potência para redes fracamente malhadas.

O algoritmo de Prim é aplicado na sequência no intuito de gravar a ordem com que os ramos serão incorporados à rede na próxima etapa.

O próximo passo, consiste em fixar os ramos da rede, utilizando o algoritmo de Prim. Na heurística apresentada neste trabalho, o valor da variável k_1 deve ser escolhido levando-se em conta o número de problemas de fluxo de potência para redes radiais que se pretende resolver.

A matriz Laplaciana estendida é então montada no processo de enumeração das

soluções para o sistema original e depois reduzida, levando em conta os ramos fixados no passo anterior. É calculado então um cofator desta matriz, obtendo assim todas as topologias radiais com os k_1 ramos fixos. A seguir é apresentado o algoritmo elaborado de forma resumida:

Dados de entrada: Topologia e dados elétricos da rede.

Etapa 1: Gerar uma lista, utilizando o algoritmo de Prim, com a ordem em que os k_1 ramos de maior peso serão fixados à rede. Considerar esses ramos fixos.

Enumeração das soluções: Montar a Matriz Laplaciana L estendida e reduzi-la aplicando o algoritmo de redução da mesma. Em seguida, calcular um cofator da matriz resultante, que terá como resultado todas as configurações do sistema.

Avaliação das soluções: Para cada topologia obtida no passo anterior, deve-se resolver um fluxo de potência para redes radiais.

Determinação da resposta: Selecionar a solução que, entre todas, apresenta menor valor de perdas ativas.

2.8. Software MATLAB

Para implementação da estratégia heurística proposta neste trabalho foi utilizado o MATLAB (*Matrix Laboratory*). Trata-se de um *software* de computação numérica desenvolvido pela empresa *MathWorks* (MATHWORKS, 2022). O MATLAB é utilizado por engenheiros para realização de cálculos numéricos envolvendo vetores e matrizes, sendo iterativo e possuindo alta performance. A linguagem utilizada é prática e intuitiva, contando com sua própria IDE (*Integrated Development Environment*) e bibliotecas (*toolboxes*).

O *software* permite ao usuário o desenvolvimento de matrizes, construção de gráficos 2D e 3D, trabalhar com números reais e complexos, análise e visualização de dados, criar aplicações web, além de poder ser integrado com outras linguagens de programação como Python, C/C++, Java, entre outras (MATHWORKS, 2022).

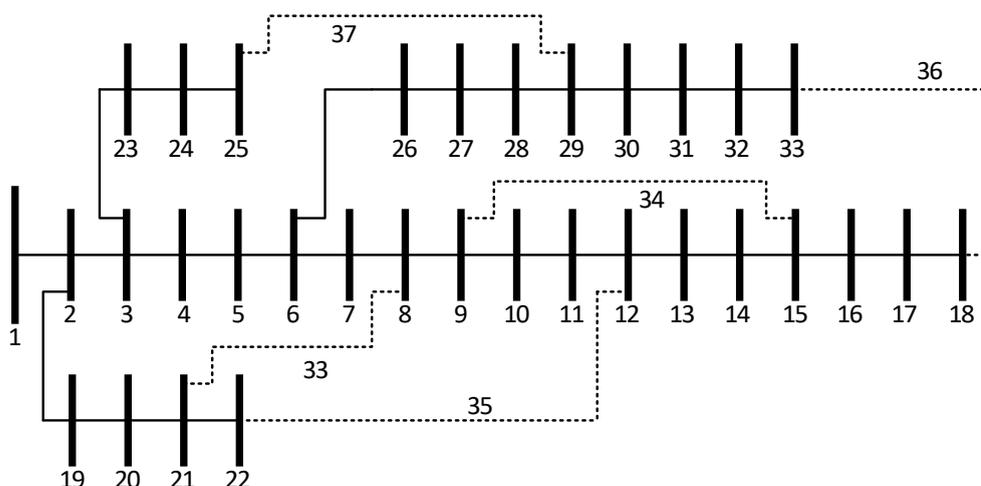
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados os resultados para os testes executados com os sistemas elétricos de 33 e 84 nós, ambos apresentados na literatura especializada. Como já mencionado, o algoritmo proposto foi desenvolvido em MATLAB, versão R2018a e os testes foram realizados em um computador contando com processador Intel® Core™ i7-7700HQ de 2,8 GHz e 16 GB de RAM. Possagnolo (2015) apresenta as especificações completas para os sistemas simulados.

3.1. Sistema de 33 nós

O sistema de 33 nós descrito pela primeira vez em Baran e Wu (1989) é composto por 32 nós de carga, um nó de subestação e 37 circuitos, sendo que 32 ramos devem estar fechados (representados pelas linhas contínuas) e 5 ramos abertos (ilustrados pelas linhas tracejadas) para obtenção de uma topologia radial. A tensão nominal é de 12,66 kV e as demandas ativas e reativas totais são 3.715 kW e 2.300 kVAr, respectivamente. Considerando todos os ramos livres, a rede apresenta 50.751 configurações radiais possíveis. Na Figura 17 ilustra-se o sistema de 33 nós em sua configuração inicial, na qual os circuitos 33, 34, 35, 36 e 37 estão abertos. Nesta topologia, o sistema apresenta perdas totais de 202,68 kW.

Figura 17 – Sistema de 33 nós



Fonte: Baran e Wu (1989).

Na Tabela 1 são compilados os resultados obtidos variando-se o parâmetro k_1 para cinco valores distintos. Quando $k_1 = 32$, apenas a topologia fornecida pelo algoritmo de Prim é considerada, e a solução apresenta 140,71 kW de perdas ativas, que representa uma redução de 30,57% em relação às perdas observadas na configuração inicial. Diminuindo-se o valor de k_1 até zero, nota-se uma melhora nas perdas, entretanto, ao custo de um tempo de processamento maior. Para $k_1 = 0$, a estratégia torna-se um algoritmo de força bruta, percorrendo as 50.751 topologias que o sistema possui no total, sendo capaz de encontrar a solução ótima, com perdas de 139,55 kW, representando uma redução de 31,14% em relação às perdas da configuração inicial.

Fixando $k_1 = 15$, isto é, selecionando 15 ramos sempre fechados, nota-se que o número de topologias radiais possíveis que o algoritmo precisa testar é 2.081. Desta forma, analisando somente essas 2.081 topologias radiais, pode-se obter a solução com as perdas mínimas de 139,55 kW em um tempo computacional razoável de 8,17s.

Tabela 1 – Resultados para o sistema de 33 nós

k_1	Nº de topologias radiais	Ramos abertos	Perdas (kW)	Tempo (s)
32	1	7, 10, 14, 28, 32	140,71	4,06
30	3	7, 9, 14, 28, 32	139,98	4,12
20	190	7, 9, 14, 28, 32	139,98	4,18
15	2.081	7, 9, 14, 32, 37	139,55	8,17
0	50.751	7, 9, 14, 32, 37	139,55	1578,19

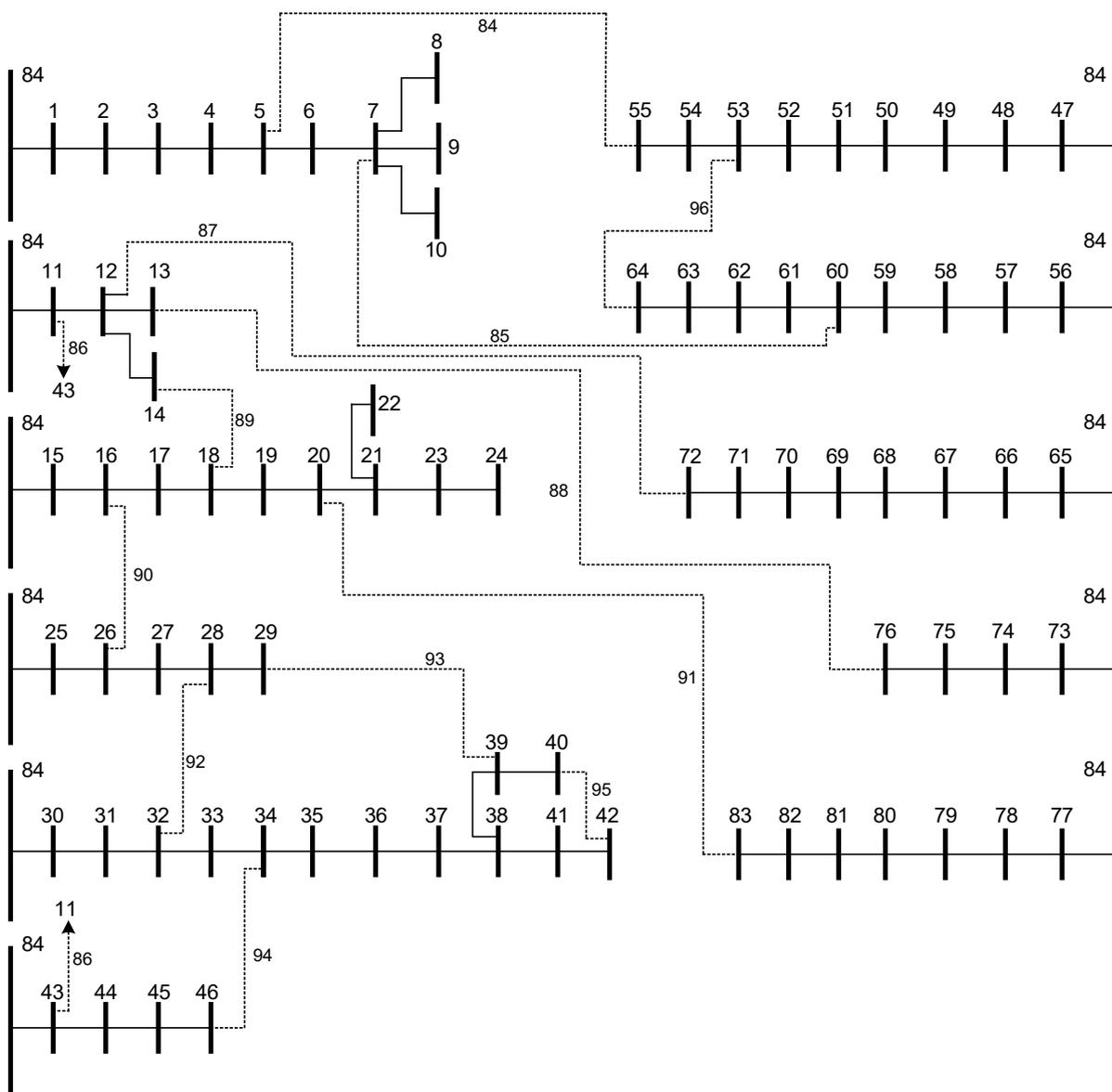
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2. Sistema de 84 nós

O sistema elétrico de 84 nós introduzido por Chiou et al. (2005) é caracterizado por conter 83 nós de carga, um nó de subestação e 96 circuitos, sendo que para formação de uma configuração radial, 83 ramos devem estar fechados (representados pelas linhas contínuas) e 13 ramos abertos (ilustrados pelas linhas tracejadas). A tensão nominal é de 11,40 kV, com demandas ativas e reativas no total de 28.351 kW e 20.700 kVAr, respectivamente. Para todos os ramos livres, a rede apresenta

$3,5196 \times 10^{11}$ configurações radiais possíveis de se obter. Na Figura 18 ilustra-se o sistema de 84 nós em sua configuração inicial, na qual os circuitos 84 a 96 encontram-se abertos, tendo neste caso perdas ativas de 532,00 kW.

Figura 18 – Sistema de 84 nós



Fonte: Chiou et al. (2005).

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos variando-se o parâmetro k_1 para quatro valores distintos. Devido às limitações de processamento, não é possível realizar testes para valores muito baixos de k_1 , pois isto implicaria analisar uma alta quantidade de topologias radiais. Logo, por exemplo, para $k_1 = 0$, ou seja, a estratégia de

força bruta, o algoritmo teria que testar todas as $3,5196 \times 10^{11}$ topologias radiais, tornando-se inviável.

Tabela 2 – Resultados para o sistema de 84 nós

k_1	Nº de topologias radiais	Ramos abertos	Perdas (kW)	Tempo (s)
83	1	7, 33, 39, 42, 63, 72, 82, 84, 86, 88, 89, 90, 92	471,73	29,22
80	2	7, 33, 39, 42, 63, 72, 82, 84, 86, 88, 89, 90, 92	471,73	29,65
70	192	7, 34, 39, 42, 55, 63, 72, 82, 86, 88, 89, 90, 92	470,90	29,71
60	3.264	7, 13, 34, 39, 42, 55, 62, 72, 83, 86, 89, 90, 92	469,88	54,61

Fonte: Elaborada pelo autor.

É possível verificar que a estratégia heurística apresentada neste trabalho consegue chegar à topologia radial com as menores perdas para $k_1 = 60$, com perdas ativas de 469,88 kW, obtidas após analisar 3.264 configurações radiais, em um tempo computacional de 54,61 s. Esse valor de perdas apresenta uma redução 11,32% em relação às perdas da topologia inicial. Para $k_1 = 83$, apenas a topologia radial obtida pelo algoritmo de Prim é considerada, e a solução obtida neste caso apresenta perdas de 471,33 kW, valor 11,4% menor do que o encontrado para a configuração inicial. Diminuindo-se o valor do parâmetro k_1 , verifica-se uma melhora nas perdas, ao custo de um maior esforço de processamento, como visto para o outro sistema analisado.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho, é apresentado um algoritmo heurístico para o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica no intuito de minimizar as perdas ativas da rede. A estratégia elaborada utiliza na primeira etapa o algoritmo de Prim modificado para fixar k_1 ramos do sistema sempre fechados com base nos maiores fluxos de potência quando todos os ramos estão conectados. Em seguida, são obtidas todas as topologias radiais resultantes que apresentam os k_1 conectados e resolve-se um fluxo de potência radial para cada uma delas.

O algoritmo heurístico foi implementado e testado para os sistemas de 33 e 84 nós, para os quais foi capaz de obter as soluções ótimas do problema, conhecidas na literatura especializada. Para o sistema de 33 nós, o algoritmo atingiu o ótimo global em 8,17 s, com o ajuste do parâmetro $k_1 = 15$ e após executar um fluxo de potência para redes fracamente malhadas e 2.081 fluxos de potência para redes radiais. Já para a rede de 84 nós, chegou-se à solução ótima em um tempo computacional de 54,61 s, sendo necessário para isso o ajuste de $k_1 = 60$ e a execução de um fluxo de potência para redes fracamente malhadas e 3.264 fluxos de potência radiais. Verifica-se que, realizando o ajuste do parâmetro k_1 , foi possível determinar as soluções para os dois sistemas testados, destacando que quanto menor o valor de k_1 , mais alta é a probabilidade de se obter a solução ótima do problema, ao custo de uma capacidade de processamento maior.

Trabalhos futuros devem incluir a estratégia apresentada neste trabalho em algoritmos mais robustos, como meta-heurísticas, por exemplo, para geração de soluções iniciais de boa qualidade.

REFERÊNCIAS

- ABABEI, C.; KAVASSERI, R. Efficient network reconfiguration using minimum cost maximum flow-based branch exchanges and random walks-based loss estimations. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 26, n. 1, p. 30-37, 2011.
- AHMADI, H. E MARTÍ, J. R. Minimum-loss network reconfiguration: A minimum spanning tree problem, *Sustainable Energy, Grids and Networks*. Oxford: Elsevier Ltd, 1, p. 1 – 9, 2015.
- AMASIFEN, J. C. C.; ROMERO, R.; MANTOVANI, J. R. S. Algoritmos evolutivos dedicados à reconfiguração de redes radiais de distribuição sob demandas fixas e variáveis – Estudo dos operadores genéticos e parâmetros de controle. *Controle & Automação*, Campinas, v. 16, n. 3, p. 303-317, 2005.
- BARAN, M. E.; WU, F. F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, New York, v. 4, n. 2, p. 1401- 1407, 1989.
- BOROZAN, V.; RAJIČIĆ, D.; AČKOVSKI, R. Minimum loss reconfiguration of unbalanced distribution networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, New York, v. 12, n. 1, p. 435- 442, 1997.
- BUENO, E. A. Redução de perdas técnicas através de reconfigurações de redes de distribuição de energia elétrica sob demandas variáveis. 2005. 148 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
- CARREÑO, E. M., ROMERO, R. e PADILHA-FELTRIN, A. An efficient codification to solve distribution network reconfiguration for loss reduction problem, *IEEE Transactions on Power Systems*. Piscataway: v. 23, n. 4, p. 1542 – 1551, 2008.
- CHIOU, J. P.; CHANG, C. F.; SU, C. T. Variable scaling hybrid differential evolution for solving network reconfiguration of distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 20, n. 2, p. 668-674, 2005.
- CIVANLAR, S.; GRAINGER, J. J.; YIN, H.; LEE, S. S. H. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, New York, v. 3, n. 3, p. 1217- 1223, 1988.
- DELBEM, A. C. B., CARVALHO, A. C. P. de L. F. de e BRETAS, N.G. Main chain representation for evolutionary algorithms applied to distribution system reconfiguration, *IEEE Transactions on Power Systems*. Piscataway, v. 20, n. 1, p. 425 – 436, 2005.
- GOMES, F. V.; CARNEIRO JÚNIOR, S.; PEREIRA, J. L. R.; VINAGRE, M. P.; GARCIA, P. A. N.; ARAUJO, L. R. A new heuristic reconfiguration algorithm for large distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 20, n. 3, p.

1373-1378, 2005.

GOSWAMI, S. K.; BASU, S. K. A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization. *IEEE Transactions on Power Delivery*, New York, v. 7, n. 3, p. 1484-1491, 1992.

HARRIS J. M.; HIRST J. L.; MOSSINGHOFF M. J. *Combinatorics and graph theory*. 2. ed. New York: Springer, 2008. 381 p.

LAVORATO, M.; FRANCO, J. F.; RIDER, M. J.; ROMERO, R. Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 26, n. 4, p. 172-180, 2012.

LEE, R. E.; BROOKS, C. L. A method and its application to evaluate automated distribution control. *IEEE Transactions on Power Delivery*, New York, v. 3, n. 3, p. 1232-1240, 1988.

LÓPEZ, E.; OPAZO, H.; GARCÍA, L.; BASTARD, P. Online reconfiguration considering variability demand: applications to real networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 19, n. 1, p. 549-553, 2004.

MACEDO, L. H. et al. A contribution to the optimization of the reconfiguration problem in radial distribution systems, *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*. Heidelberg: Springer US, v. 29, n. 6, p. 756 - 768, 2018.

MATHWORKS. *MATLAB Capabilities*. Disponível em: https://www.mathworks.com/products/matlab.html?s_tid=mlh_so_learn. Acesso em: 16 fev. 2023.

MERLIN, A.; BACK, H. Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system. In: *POWER SYSTEM COMPUTATION CONFERENCE*, 5., 1975, Cambridge. *Proceedings...* Zurich: PSCC, 1975. p. 1-18.

MENDOZA, J. et al. Minimal loss reconfiguration using genetic algorithms with restricted population and addressed operators: Real application, *IEEE Transactions on Power Systems*. Piscataway, v.21, n. 2, p. 948 - 954.

MORTON, A. B. e MAREELS, I. M. Y. An efficient brute - force solution to the network reconfiguration problem. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Piscataway, v. 15, n. 3, p. 996 - 1000, 2000.

POSSAGNOLO, L. H. F. M. *Reconfiguração de sistemas de distribuição operando em vários níveis de demanda através de uma meta-heurística de busca em vizinhança variável*. Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho', 2015.

RAJU, G. K. V.; BIJWE, P. R. An efficient algorithm for minimum loss reconfiguration of distribution system based on sensitivity and heuristics. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 23, n. 3, p. 1280-1287, 2008.

SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H. W.; SEMLYEN, A.; LUO, G. X. A compensation based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 3, n. 2, p. 753-762, 1988.

SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H. W. Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction. IEEE Transactions on Power Delivery, New York, v. 4, n. 2, p. 1492-1498, 1989.

TALESKI, R.; RAJIĆIĆ, D. Distribution network reconfiguration for energy loss reduction. IEEE Transactions on Power Systems, New York, v. 12, n. 1, p. 398-406, 1997.

TELES, V.; MACEDO, L.H. ROMERO, R. Estratégia Heurística para a Reconfiguração de Sistemas de Distribuição. Sociedade Brasileira de Automatica, Campinas, v.2, n. 1, p. 1- 7, 2020.

TINNEY, W. F. Compensation methods for network solutions by optimally ordered triangular factorization. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, New York, v. PAS-91, n. 1, p. 123-127, 1972.